کاهش خیز جانبی قاب با کنترل فعال*

محمد رضایی پژند [۱]		محمد رضا اکبر زاده توتونچی [۲]		علی نیکدل [۳]

چکیده *کمینه کردن پاسخ سازه در برابر نوسان زمین با بهره‌گرفتن از ساختار کنترل حلقه باز هدف این مقاله می‌باشد. در این گونه کنترل فقط یک شبکه‌ی عصبی پیش‌بین وجود دارد و تنها نوسان زمین را انگاره می زند. شبکه‌ی عصبی براساس چند شتاب نگاشت ثبت شده آموزش می‌بیند و می‌تواند تغییرهای شتاب را در یک گام جلوتر پیش‌بینی کند. نیروی کنترل از حاصل ضرب جرم هر طبقه در شتاب گام جلوتر به دست می‌آید. این ساختار تا حدودی پاسخ سازه را کمینه می سازد. برای تضمین پایداری، یک کنترل‌کننده خطی به ساختار کنترل افزوده می‌شود و یک سامانه کنترل ترکیبی پدید می آید. این سامانه، افزون بر تضمین پایداری ساختارکنترل، کارکرد کنترل سازه را بهبود می‌بخشد. سرانجام، اثر تغییر جرم سازه بر روی ساختار کنترل بررسی می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند، اثر تغییر جرم سازه بر روی سامانه ی کنترل ترکیبی، نسبت به سامانه کنترل با شبکه‌ی عصبی پیش‌بین، کمتر می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی کنترل سازه، شتاب زمین، شبکه عصبی، کنترل‌کننده، پایداری، زمین لرزه،کنترل حلقه باز

Reducing Frame Lateral Deflection by Active Control

M. Rezaieepajand		M.R. Akbarzadeh		A. Nikdel

Abstract *It is aimed to minimize the structure response against the earth vibration by the use of the open loop control system. In such a control, only one predicting neural network is utilized, which estimates only the earth vibration. The neural network is instructed by some recorded acceleration data, and it is able to predict the acceleration variation for the subsequent step. The control force is equal to the product of the mass of each story to its next step acceleration. This control system leads to the approximate minimum response. Moreover, to guarantee the system stability, a linear controller is added to the system. The resulted mixed control system can assure the system stability and also has better performance. Finally, the effect of the structural mass variation on the control system is investigated. The findings show that the effect of the structural mass variation on the mixed control system is smaller than the one by the predicting neural network.*

Key Words Structural Control, Earth Acceleration, Neural Networks, Controller, Stability, Earthquake, Open-loop Control.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۶/۲۷ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۹۰/۳/۱۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسؤول، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

در سال‌های اخیر، پژوهش درباره کنترل فعال سازه، افزایش چشمگیری یافته است. همچنین، تحلیلگران روش‌های بسیاری برای کنترل فعال سازه پیشنهاد کرده‌اند. از میان آن‌ها، می‌توان شیوه‌های وابسته به الگوی سازه مانند: کنترل بهینه و کنترل تصادفی را نام برد. هر کدام از این فن‌ها، دارای زیر شاخه‌های زیادی می‌باشند. این فرآیندها نیاز به تحلیل و یا تشخیص دستگاه دارند، که با انجام این کار و با کمک یک کنترل‌کننده، نوسان‌های سازه به فرمان در می‌آیند. در برابر این، کنترل هوشمند کوشش در شناسایی دستگاه با وجود عدم قطعیت‌های موجود در آن را دارد. باید افزود، شبکه‌های عصبی ابزار توانمندی برای شناسایی رفتار دستگاه و کنترل آن هستند. توانایی شبکه‌ی عصبی در شبیه‌سازی به اندازه‌ای است که می‌تواند رفتار غیرخطی سازه‌هایی با چندین درجه آزادی را در برابر نوسان زمین، شبیه‌سازی و یا حتی پیش‌بینی کند [1-3] .

راهکارهای زیادی برای کنترل سازه به صورت حلقه بسته، با بهره گرفتن از شبکه‌های عصبی در دست است. ساده‌ترین روش استفاده از شبکه‌ی عصبی در کنترل سازه، پویا کردن مولفه‌های شیوه‌ی کنترل بهینه با شبکه‌ی عصبی می‌باشد [4]. در این روش، دو ماتریس Q و R، که در مدت کنترل سازه آن‌ها را ثابت می‌پندارند، در هر لحظه به کمک شبکه‌ی عصبی مشخص می‌شوند. در روش دوم، ساختار کنترل، شامل یک شبکه‌ی عصبی و الگوی مرجع می‌باشد. در این شیوه، کوشش می‌شود که با استفاده از یک شبکه‌ی عصبی، رفتار سازه به رفتار الگوی مرجع نزدیک شود [5]. روش سوم، که معمول‌ترین راهکار برای به کاربردن شبکه‌های عصبی در کنترل سازه می‌باشد، از دو شبکه‌ی عصبی بهره می‌جوید. شبکه‌ی عصبی نخست، که شبیه‌ساز نام دارد، رفتار سازه را پیش‌بینی می‌کند. شبکه‌ی عصبی دوم را که کنترل‌کننده می‌نامند، وظیفه ایجاد نیروی کنترل را با توجه به پیش‌بینی رفتار سازه بر عهده دارد [6،3،9-7 ،10]. روش چهارم، که حالت تکمیل یافته فن سوم است، تنها از یک شبکه‌ی عصبی کنترل‌کننده استفاده می‌کند و به جای پیش‌بینی رفتار سازه، داده‌های الگوی سازه را به کار می‌برد [11] . روش پنجم، استفاده از یک شبکه‌ی عصبی شبیه‌ساز و یک قانون کنترل (راهکار نیوتن- رافسون) می‌باشد. وظیفه شبکه‌ی عصبی پیش‌بینی شتاب سازه است و قانون کنترل با توجه به پاسخ شبکه‌ی عصبی و نسبت تغییر نیروی کنترل، برای گام جلوتر نیروی کنترل مناسب ایجاد می‌کند.[12]. روش ششم از دو شبکه‌ی عصبی بهره می‌جوید. نخستین شبکه‌ی عصبی، شتاب سازه را در یک گام جلوتر پیش‌بینی می‌کند و شبکه‌ی عصبی دوم با توجه به پاسخ شبکه‌ی عصبی و شتاب زمین، نیروی کنترل را به دست می‌آورد[13]. در روش هفتم از یک شبکه‌ی عصبی کنترل‌کننده و تحلیل مودال استفاده می‌شود. شبکه‌ی عصبی با صفر کردن نیروی وارد بر مود نخست سازه، نیروی کنترل گام جلوتر را پدید می‌آورد[14].

در این مقاله، از روشی متفاوت و بسیار ساده‌تر از شیوه‌های به کار رفته برای کنترل سازه استفاده می‌شود. در واقع، به جای بهره گرفتن از پیش‌بینی رفتار سازه، برای کنترل از پیش‌بینی شتاب زمین استفاده خواهد شد. همچنین، در راهکار جدید، برای یافتن نیروی کنترل کننده، به پاسخ سازه نیاز نیست. بنابراین، روش پیشنهادی ساختار کنترل برگشتی یا بازخورد را لازم ندارد. از این رو, برای ساختار کنترل، تنها از یک ساختار رفت استفاده می‌شود. در شیوه‌ی پیشنهادی، هدف پیش‌بینی شتاب زمین در هر لحظه می‌باشد. همچنین، نیروی کنترل‌کننده را می‌توان از ضرب جرم هر طبقه در شتاب پیش‌بینی شده به دست آورد و با وارد کردن این نیرو، تغییرمکان سازه را به صفر نزدیک کرد. خاطر نشان می‌کند، اگر برای یافتن نیروی کنترل‌کننده از شتاب یک گام پیشتر استفاده شود، باز هم پاسخ‌های مناسبی به دست خواهد آمد.

پیش‌بینی شتاب زمین

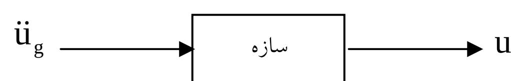
رفتار زمین در هنگام زمین لرزه، به طور کامل غیر خطی

و نامشخص می‌باشد و نمی‌توان آن را با رابطه ساده‌ای مشخص کرد. از این‌رو، باید با کمک توانایی شبکه‌های عصبی به تشخیص و پیش‌بینی رفتار زمین پرداخت. برای انجام این کار، شبکه عصبی به گونه‌ای آموزش داده می‌شود که بتواند مقدار تغییرهای شتاب در گام بعدی (که می‌توان هر گام را برابر تاخیر زمانی در نظر گرفت) را پیش‌بینی کند. از جمع مقدار تغییرهای شتاب پیش بینی شده برای گام بعدی و مقدار شتاب در گام پیشین، مقدار شتاب در گام بعدی به دست می‌آید. شبکه عصبی که برای این کار استفاده می‌شود، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه است. ورودی شبکه عصبی پرسپترون شتاب چند گام پیشین زمین و برونداد آن تغییر شتاب زمین برای گام بعدی می‌باشد. می‌توان برای آموزش آن از شیوه‌های مختلف آموزش شبکه‌های عصبی بهره جست.

ساختارهای کنترل

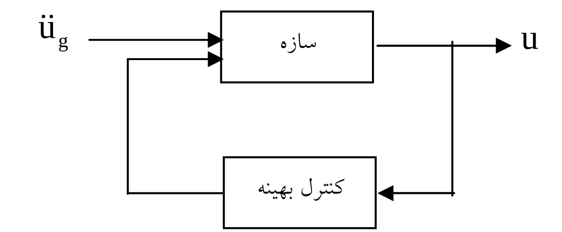
برای ارزیابی شیوه پیشنهادی کنترل فعال سازه، بهتر است این راهکار با یک روش کنترل غیر هوشمند مقایسه شود. بنابراین، در ادامه کار، یک نمونه عددی برای مقایسه شیوه پیشنهادی، با یک روش کنترل غیر هوشمند ارائه می‌شود. ساختارهای کنترل که برای نمونه عددی به کار می‌رود، به قرار زیر هستند:

حالت یکم: نخستین حالت به سازه کنترل نشده اختصاص داده خواهد شد. در این حالت، فقط شتاب زمین به سازه وارد می‌شود و هیچ نیروی کنترل کننده‌ای برای کنترل سازه وجود ندارد. در بیشتر مقاله‌های پیشین، تنها این حالت برای ارزیابی استفاده شده است. شکل(۱) این حالت را نشان می‌دهد.



شکل۱ الگوریتم سازه کنترل نشده

حالت دوم: از شیوه کنترل بهینه برای ایجاد نیروی کنترل استفاده خواهد شد. با این راهکار کنترل سازه، روش جدید بهتر ارزیابی می‌شود. یادآور می‌شود که روش‌های گوناگونی برای کنترل بهینه سازه وجود دارد. در نمونه عددی روش تنظیم کننده درجه دو خطی (LQR) به کار خواهد رفت. ساختار کنترل بهینه را می‌توان در شکل (۲) مشاهده کرد.

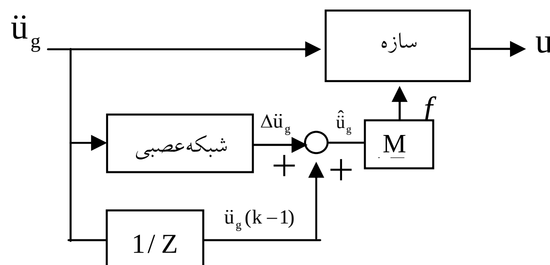


شکل ۲ الگوریتم کنترل بهینه

حالت سوم : این ساختار کنترلی، همانند شکل(۳)، شامل شبکه عصبی پیش‌بین و سازه می‌باشد. شبکه عصبی پیش‌بین با توجه به شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده آموزش داده می‌شود و سپس در داخل الگوریتم کنترلی قرار می‌گیرد. در هنگام زلزله، با پیش‌بینی شتاب زمین در یک گام جلوتر، نیروی کنترلی به دست می‌آید. از این رو، نیروهایی که به سازه وارد می‌شوند، به قرار زیر می‌باشند:

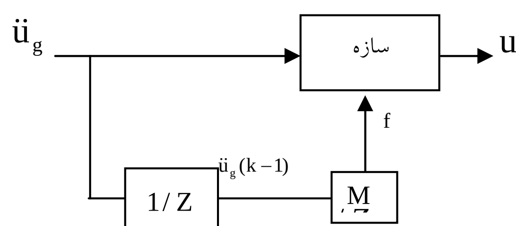
۱. نیرویی که شتاب زمین به سازه وارد می‌کند.

۲. نیرویی کنترلی که از مجموع شتاب پیشین و تغییر شتاب پیش‌بینی‌شده با شبکه عصبی پیش‌بین، حاصل می‌شود. در این ساختار کنترل، کاهش تغییرمکان سازه بستگی به میزان آموزش شبکه عصبی دارد. هر مقدار که شبکه عصبی پیش‌بین بیشتر آموزش دیده باشد، پاسخ بهتری از سازه به دست خواهد آمد.



شکل ۳ الگوریتم کنترل با استفاده از شبکه عصبی

حالت چهارم: در این فرآیند، به جای پیش‌بینی شتاب برای گام بعدی، از شتاب در گام پیشین استفاده می‌شود. شکل (٤)، راهکار مزبور را نشان می‌دهد. در این شیوه اگر هر مقدار دیرکرد زمانی کمتر باشد، پاسخ سازه بهتر خواهد بود. در شکل‌های کنونی، $1/Z$ دیرکرد زمان می‌باشد. این ساختارهای کنترلی در برنامه MATLAB شبیه‌سازی شده و بر روی یک سازه اجرا می‌شود [15,5].



شکل ٤ الگوریتم کنترل با استفاده از گام پیشین شتاب زمین

نمونه عددی یکم

نخستین نمونه عددی، به آموزش شبکه‌ی عصبی می‌پردازد، که توانایی پیش‌بینی مقدار تغییر شتاب زمین در گام بعدی را دارد. برای انجام این کار، از یک شبکه عصبی پرسپترون چهار لایه استفاده می‌شود. لایه‌ی ورودی، دارای ١٠ نرون است. ورودی شبکه عصبی، مقدارهای شتاب زمین در ١٠ گام قبل می‌باشد. شبکه عصبی دارای دو لایه مخفی با ١٠ و ١٥ نرون و لایه خروجی با ١ نرون است. این شمار نرون در لایه مخفی، با ارزیابی چندین شبکه عصبی انتخاب شدند. برای بررسی عملکرد شبکه‌های عصبی، مجموع قدر مطلق خطای پیش‌بینی شده (e)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e = \sum_{i=1}^{n} \left| \hat{\ddot{u}}_g(i) - \ddot{u}_g(i) \right|$$

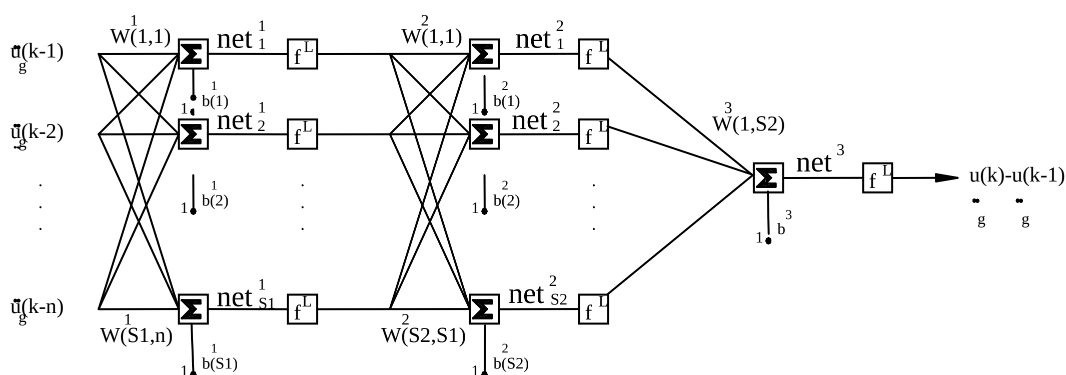
در این رابطه، $\hat{\ddot{u}}_g(i)$ ، شتاب پیش‌بینی شده زلزله و $\ddot{u}_g(i)$، شتاب واقعی زلزله درگام i–ام است. عامل e، برای چند شبکه عصبی با نرون‌های مختلف محاسبه و بر این اساس شبکه‌ای با ١٠ و ١٥ نرون در لایه‌ی مخفی، برای پیش‌بینی شتاب زمین انتخاب شد. نتیجه‌ها در جدول (١) ارائه شده‌اند.

جدول ١ پاسخ‌های نمونه‌ی عددی یکم

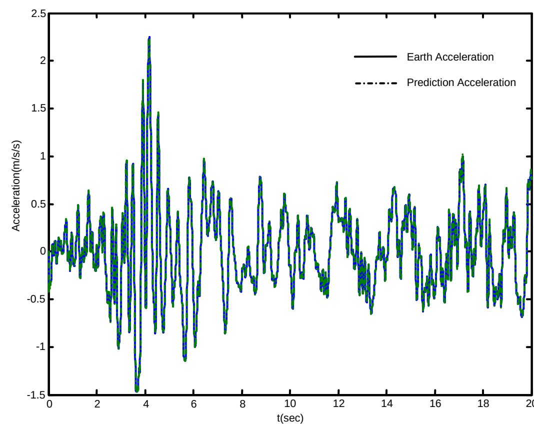
e	شمار نرون‌های لایه سوم	شمار نرون‌های لایه دوم
٢٥٣/٥	١٠	١٥
٢٥٤/٣	٨	١٠
٢٥٥	٦	١٢
٢٥٨/٤	٨	١٥
٢٦٠/٧	١٢	١٢
٢٨٣/٩	١٤	١٥
٢٨٩/٩	١١	١٣
٢٩٥/٢	١١	١١
٣٠٤/٦	١٣	١٥
٣٣٢/٧	١٣	١٣

تابع‌های لایه‌های مخفی، سیگموئید و تابع لایه برونداد، خطی است. این شبکه عصبی، با دو شتاب نگاشت السنترو و حچینو، که ١٩٠٠٠ داده دارد، آموزش می‌بینند.

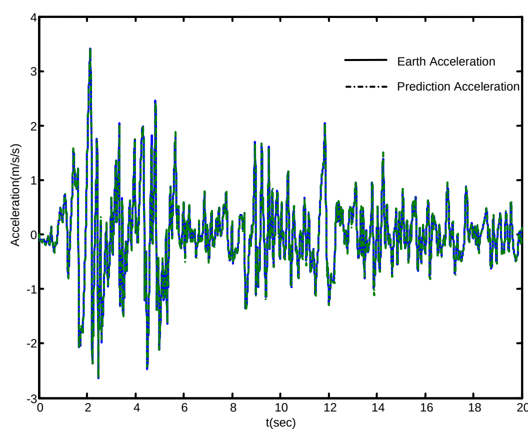
برای آموزش شبکه عصبی از روش آموزش مارکوارت- لونبرگ، که همگرایی زیادی دارد، استفاده می‌شود. شکل (٥)، شبکه عصبی مورد نظر را نشان می‌دهد. مقدار دیرکرد زمانی ٠/٠٠٥ ثانیه است. پس از کامل شدن آموزش، نخست شبکه عصبی آموزش دیده برای پیش‌بینی دو شتاب‌نگاشت السنترو و حچینو، که مجموعه داده‌های آموزش را تشکیل می‌دهند، به کار می‌رود. این کار، میزان توانایی شبکه عصبی را در پیش‌بینی داده‌های آموزش نشان می‌دهد. شکل‌های (٦) و (٧)، پیش‌بینی یک گام جلوتر را برای شتاب‌نگاشت‌های السنترو و حچینو نشان می‌دهد. سپس، از شبکه عصبی آموزش دیده برای پیش‌بینی دو شتاب‌نگاشت نورتریج و کوبه که داده‌های آزمون هستند، بهره گرفته می‌شود. این کار، میزان توانایی شبکه عصبی را در پیش‌بینی شتاب‌نگاشت‌های جدید مشخص می‌کند. در شکل‌های (٨) و (٩)، پیش‌بینی یک گام جلوتر برای شتاب‌نگاشت‌های نورتریج و کوبه نشان داده شده است. جدول(٢)، میزان انحراف از معیار و درصد خطای مقدارهای پیش‌بینی شده نسبت به مقدارهای واقعی شتاب زمین را برای شتاب‌نگاشت‌های السنترو، حچینو، نورتریج و کوبه نشان می‌دهد.



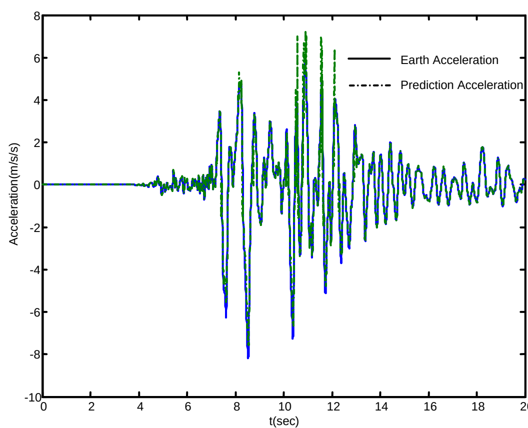
شکل ۵ شبکه عصبی پرسپترون چند لایه پیش‌بین



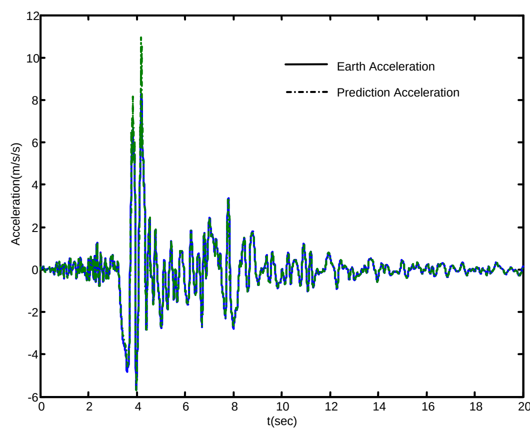
شکل ٦ پیش بینی یک گام جلوتر شتاب‌نگاشت السنترو، توسط شبکه عصبی



شکل ۷ پیش بینی یک گام جلوتر شتاب‌نگاشت حچینو ، توسط شبکه عصبی



شکل ۸ پیش بینی یک گام جلوتر شتاب‌نگاشت نورتریج، توسط شبکه عصبی



شکل ۹ پیش بینی یک گام جلوتر شتاب نگاشت کوبه،توسط شبکه عصبی

جدول ۲ میزان انحراف از معیار مقدارهای پیش‌بینی شده شتاب نسبت به شتاب واقعی

شتاب‌نگاشت	$\frac{\ddot{u}_{g_{max}}-\hat{\ddot{u}}_{g_{max}}}{\ddot{u}_{g_{max}}}*10^{2}$	$\frac{\ddot{u}_{g_{min}}-\hat{\ddot{u}}_{g_{min}}}{\ddot{u}_{g_{min}}}*10^{2}$	انحراف از معیار ($\frac{m}{S^2}$) $=\sqrt{\frac{\sum(\ddot{u}_g-\hat{\ddot{u}}_g)^2}{n}}$
السنترو(آموزش)	۰/۶	۵/۱۱	۰/۰۲۹۴
حچینو(آموزش)	۳/۰	۰/۱۱۵	۰/۰۱۱۷
نورتریج(آزمایش)	۱۰/۸	۱۴/۰	۰/۲۸۷
کوبه(آزمایش)	۱۲/۸	۳/۹۶	۰/۲۸۸

در این‌جا، $\hat{\ddot{u}}_{g_{max}}$ پاسخ شبکه عصبی می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۶) تا (۹) و جدول (۲)، می‌توان دریافت که شبکه عصبی توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی تغییر شتاب، در یک گام جلوتر دارد. بنابراین، می‌توان از این پیش‌بینی برای تولید نیروی کنترلی بهره گرفت.

نمونه عددی دوم

در نمونه عددی دوم، یک قاب سه طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سقف‌های این سازه صلب فرض می‌شود. بنابراین، سازه سه درجه آزادی دارد. معادله حاکم و ویژگی‌های سازه به قرار زیر می‌باشند [16]:

$$[m]\{\ddot{u}(t)\}+[c]\{\dot{u}(t)\}+[k]\{u(t)\}= -[m]\{\ddot{u}_g(t)\}+[d]\{f(t-\Delta t)\}$$

$$[m]=\begin{bmatrix}31.285 & 0 & 0\\ 0 & 31.285 & 0\\ 0 & 0 & 31.285\end{bmatrix}\ \frac{kN.s^2}{m} \qquad (۱)$$

$$[k]=\begin{bmatrix}87424.6 & -52346.4 & 11771\\ -52346.4 & 96368.7 & -51810.1\\ 11771 & -51810.1 & 42525.1\end{bmatrix}\ \frac{kN}{m} \qquad (۲)$$

$$[c]=\begin{bmatrix}12.207 & -1.827 & 1.966\\ -1.827 & 14.57 & -0.088\\ 1.966 & -0.088 & 13.95\end{bmatrix}\ \frac{kN-s}{m} \qquad (۳)$$

با تبدیل معادله حرکت سازه به معادله دیفرانسیلی درجه یک (معادله فضای حالت)، نتیجه زیر به دست می‌آید:

$$\{\dot{U}\}=[A].\{U\}+[B]\{F\} \qquad (۴)$$
$$\{Y\}=[C].\{U\}+[D]\{F\}$$

$$\{U\}=\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\}^T,$$
$$u_4=\dot{u}_1, u_5=\dot{u}_2, u_6=\dot{u}_3$$
$$\{\dot{U}\}=\{\dot{u}_1,\dot{u}_2,\dot{u}_3,\dot{u}_4,\dot{u}_5,\dot{u}_6\}^T,$$
$$\dot{u}_4=\ddot{u}_1, \dot{u}_5=\ddot{u}_2, \dot{u}_6=\ddot{u}_3 \qquad (۵)$$

$$\{F\}=\left\{\ddot{u}_g\ ,\ \frac{f}{m}\right\}^T\ ,\quad f=[m]\left[\hat{\ddot{u}}_g(t-\Delta t)\right] \qquad (۶)$$

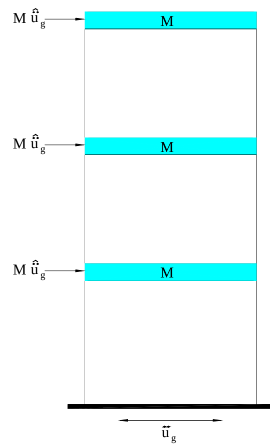
$$[A]=\begin{bmatrix}[0] & [I]\\ [-m^{-1}k] & [-m^{-1}c]\end{bmatrix},\ [B]=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1\end{bmatrix}^T \qquad (۷)$$

$$[C]=\begin{bmatrix}[I] & [0]\\ [0] & [I]\\ [-m^{-1}k] & [-m^{-1}c]\end{bmatrix},$$

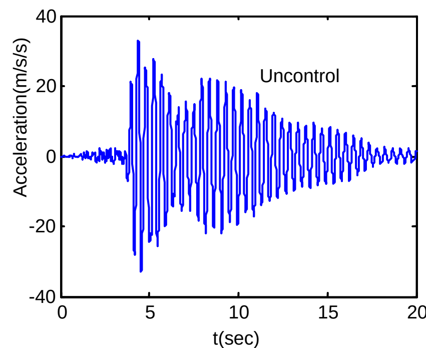
$$[D]=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0&-1&-1&-1\\ 0&0&0&0&0&0&1&1&1\end{bmatrix}^T \qquad (۸)$$

در این رابطه‌ها، f نیروی کنترل و d موقعیت نیروی کنترل می‌باشد. در معادله فضای حالت، مؤلفه‌های بردار U، شامل تغییرمکان سه طبقه (u_1,u_2,u_3)، سرعت

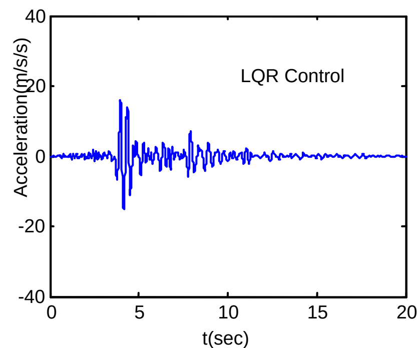
سه طبقه (u_4, u_5, u_6) و مولفه‌های بردار $\dot{U}$، شامل سرعت سه طبقه $(\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3)$ و شتاب سه طبقه $(\dot{u}_4, \dot{u}_5, \dot{u}_6)$ می‌باشند. این نمونه عددی، در چهار حالت: کنترل نشده، کنترل با یک گام پیشین، کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین و کنترل بهینه، تحلیل می‌شود. کنترل بهینه این نمونه عددی با استفاده از تنظیم کننده درجه دو خطی صورت می‌پذیرد. سازه مورد مطالعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)، به ترتیب، مقایسه میزان شتاب ، سرعت و تغییرمکان طبقه سوم سازه را در چهار حالت و شکل (١٤) نیروی کنترل را نشان می‌دهند. مقدار بیشینه شتاب ، سرعت و تغییرمکان طبقه سوم سازه در جدول (۳) درج شده است. همچنین، میزان انحراف از معیار این کمیت‌ها در جدول (٤) آمده است.



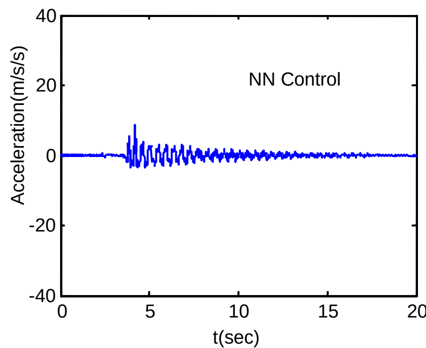
شکل ۱۰ الگوی سازه سه درجه آزادی



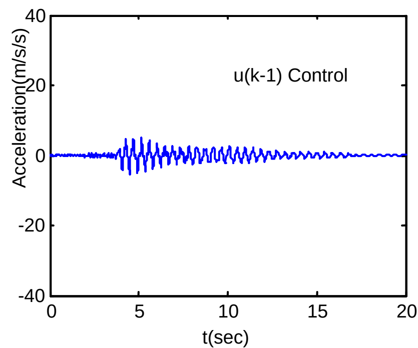
کنترل نشده



کنترل شده با روش LQR

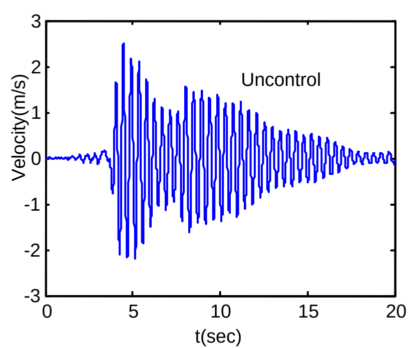


کنترل شده با شبکه عصبی

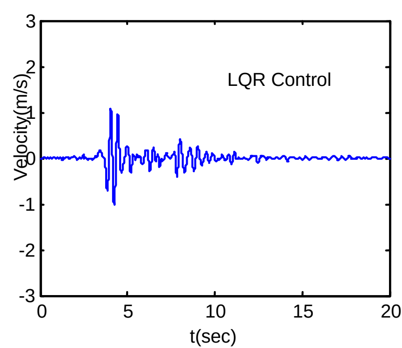


کنترل با گام پیشین شتاب زمین

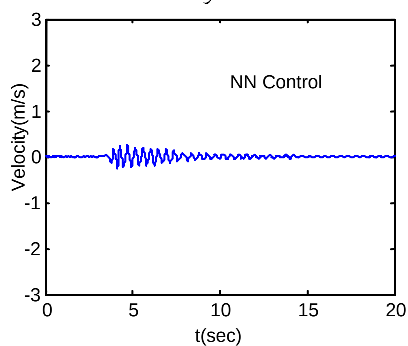
شکل ۱۱ شتاب طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در چهار حالت



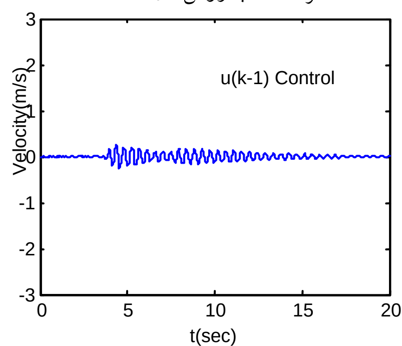
کنترل نشده



کنترل شده با روش LQR

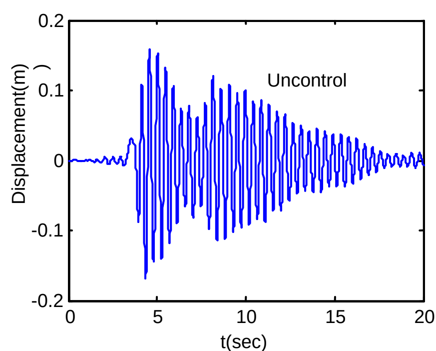


کنترل شده با شبکه عصبی

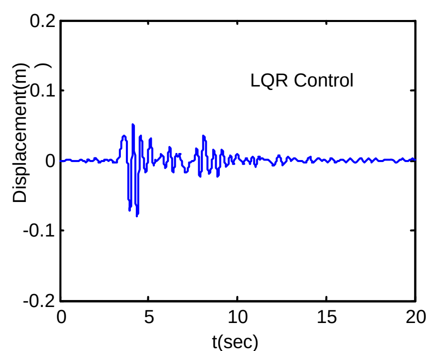


کنترل با گام پیشین شتاب زمین

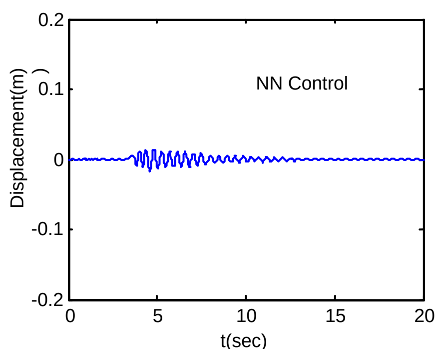
شکل ۱۲ سرعت طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در چهار حالت



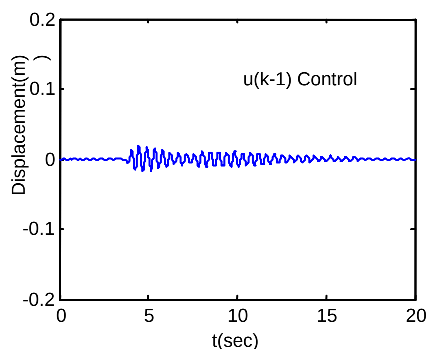
کنترل نشده



کنترل شده با روش LQR

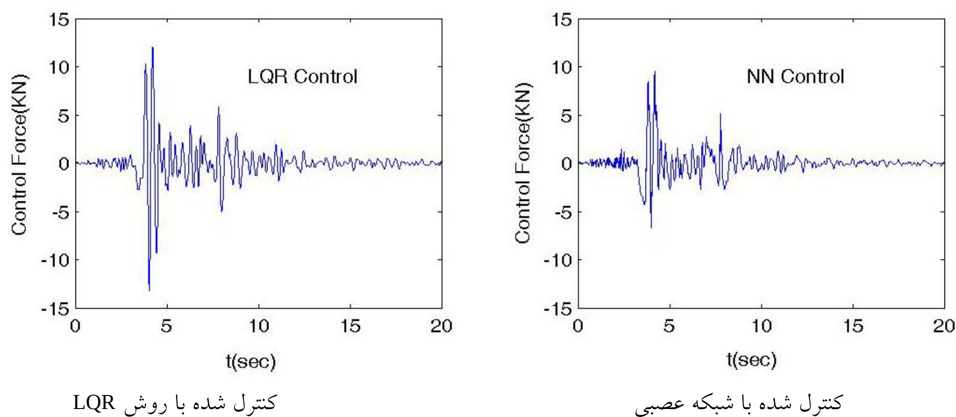


کنترل شده با شبکه عصبی



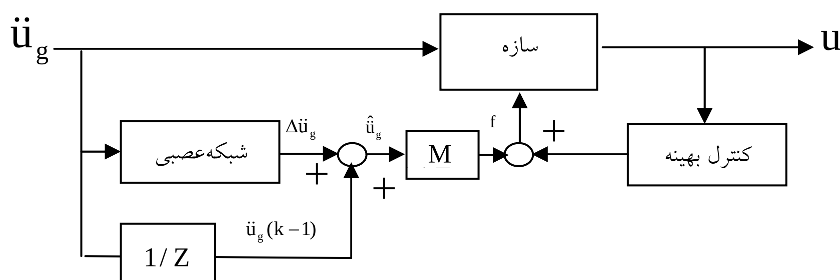
کنترل با گام پیشین شتاب زمین

شکل ۱۳ تغییرمکان طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در چهار حالت



کنترل شده با روش LQR
کنترل شده با شبکه عصبی

شکل ۱۴ نیروی کنترل طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج



شکل ۱۵ ساختار ترکیبی از کنترل بهینه و شبکه عصبی پیش‌بین

جدول ۳ بیشینه تغییرمکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه ، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج

شیوه‌های کنترل	تغییرمکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
	بیشینه	بیشینه	بیشینه
کنترل نشده	۱۵/۸۷	۲۵۱	۳۳۰۶
بهینه	۵/۱۸	۱۰۶/۹	۱۵۷۹
با شبکه عصبی	۱/۴۲	۲۶/۴	۸۶۱/۷۱
با گام پیشین	۱/۸۸	۲۴/۸	۴۹۸/۳۵

جدول ٤ انحراف از معیار مقدارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج نسبت به مقدارهای مطلوب (صفر)

شیوه‌های کنترل	انحراف از معیار		
	تغییرمکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
کنترل نشده	٤/۹۹	٦۹/۸۵	۹۹٤/۰۷
بهینه (LQR)	۱/۲۳	۱۵/۷۷	۲۳٦/۳۷
باشبکه عصبی	۰/٤۰	۵/۸٤	۱۰۰/۹۵
با گام پیشین	۰/۵۲۰	۷/٤۵	۱۱۲/۵۳

می‌توان نیروی کنترلی را با کمک محرک‌های هیدرولیکی تولید کرد. این محرک ها توانایی دارند که نیرویی در حدود 10^8 نیوتن را دارند [18,17]. بیشینه‌ی نیروی مورد نیاز برای کنترل سازه در این مقاله ۱۳۰۰۰ نیوتن است.

آن گونه که شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) و جدول‌های (۳) و (٤) نشان می‌دهند، تغییرمکان‌های سازه که یکی از مهمترین عامل در کنترل سازه می‌باشند، با راهکار پیشنهادی بیشتر به صفر نزدیک شده‌اند. بنابراین، کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین شیوه مناسب‌تری برای کنترل پاسخ سازه می‌باشد.

تضمین پایداری و بهبود عملکرد ساختار کنترل

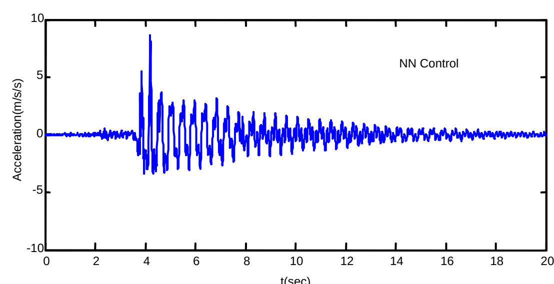
پایداری در ساختار کنترل دارای نقش مهمی می‌باشد. شیوه‌های مختلفی برای پایدار کردن ساختارهای کنترل به کار می‌رود. برای پایدار نمودن ساختارهای کنترل، که دارای شبکه عصبی‌اند، از تابع لیاپانوف و مانند آن استفاده می‌شود. این راهکارها، برای حالت کنترل برگشتی کاربرد دارند. به سخن دیگر، شیوه خاصی برای پایدار کردن ساختار کنترل، با شبکه عصبی در حالت کنترل رفت، وجود ندارد. بنابراین، برای تضمین پایداری ساختار کنترل پیشنهادی، می‌توان یک کنترل کننده بهینه به ساختار کنترل افزود. پایداری که کنترل کننده بهینه در ساختار کنترل ایجاد می‌کند، از نوع پایداری مجانبی می‌باشد. در پایداری مجانبی، پاسخ سازه از حد معینی فراتر نمی‌رود و در پایان، پاسخ سازه به مقدار مطلوب نزدیک می‌شود. با این‌کار، افزون بر تضمین پایداری ساختار کنترل، همگرایی آن نیز افزایش می‌یابد. این ویژگی، در نمونه‌هایی که در این بخش می‌آید، آشکار خواهد شد. اثبات پایداری کنترل بهینه در ساختار کنترل در دسترس است [19].

برای انجام چند کار عددی، می‌توان از مساله‌های بخش پیشین بهره جست. در این نمونه عددی، نیروی کنترل از مجموع نیروی کنترل بهینه و نیروی ناشی از شبکه عصبی پیش‌بین به دست می‌آید. بنابراین، ساختار کنترل پیشنهادی، به ساختار کنترل برگشتی تبدیل می‌شود. شکل (۱۵)، این ساختار کنترل را نشان می‌دهد.

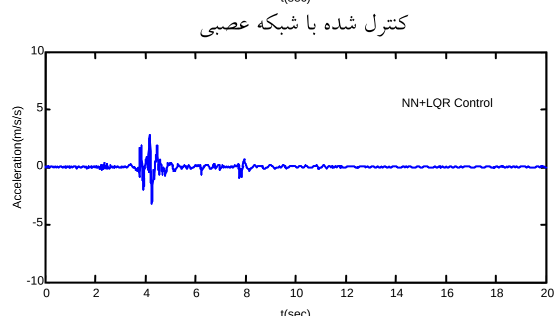
نمونه عددی سوم

اینک، به‌ارزیابی ساختار کنترل ترکیبی بر روی سازه سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. نیروی کنترل هر طبقه، از مجموع نیروی حاصل از کنترل بهینه وکنترل با شبکه عصبی پیش‌بین به دست می‌آید. یادآوری می شود که در نمونه عددی دوم، به کارگیری کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین برای کنترل سازه، دارای بهترین پاسخ بود. بنابراین، در این نمونه عددی، پاسخ‌های کنترل ترکیبی با پاسخ‌های کنترل با شبکه عصبی مقایسه می‌شود. شکل‌های (۱٦)، (۱۷) و (۱۸) مقایسه دو ساختار کنترل و

شکل (۱۹)، نیروی کنترل را نشان می‌دهند. مقدار بیشینه پاسخ‌ها در جدول (۵) و میزان انحراف از معیار پاسخ‌ها نسبت به پاسخ مطلوب در جدول (٦) درج شده است.

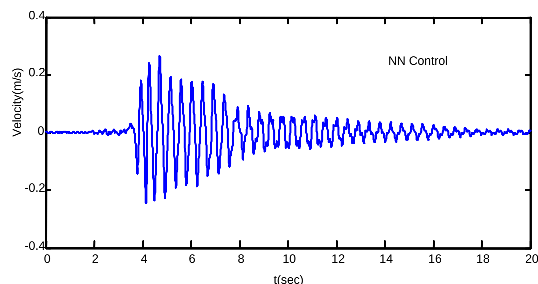


کنترل شده با شبکه عصبی

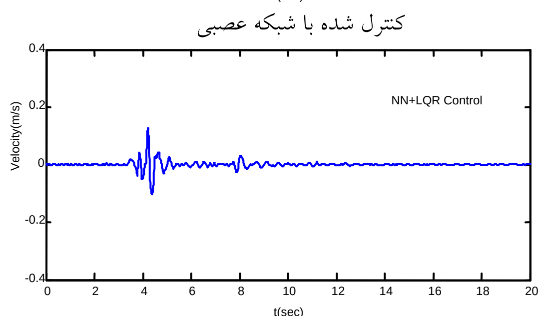


کنترل ترکیبی

شکل ١٦ شتاب طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در دو حالت

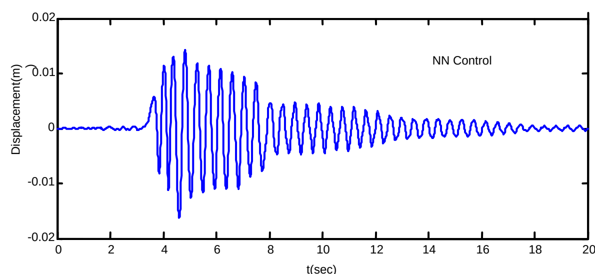


کنترل شده با شبکه عصبی

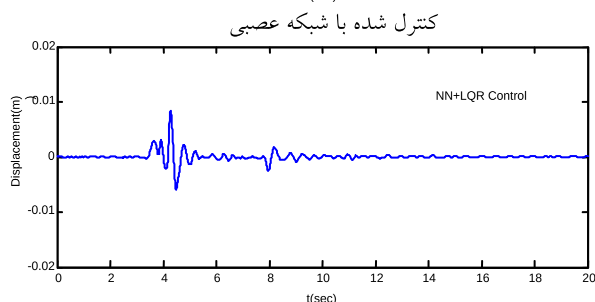


کنترل ترکیبی

شکل ١٧ سرعت طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در دو حال

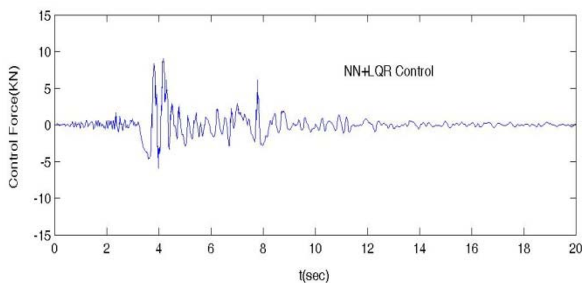


کنترل شده با شبکه عصبی



کنترل ترکیبی

شکل ١٨ تغییرمکان طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج در دو حالت



شکل ١٩ نیروی کنترل طبقه سوم سازه زیراثرشتاب نگاشت نورتریج

جدول ۵ بیشینه‌ی تغییرمکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج

شیوه‌های کنترل	تغییرمکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
	بیشینه	بیشینه	بیشینه
با شبکه عصبی + (LQR)	۰/۵۵	۱۲/۵۷	۲۷۳/۹٤
با شبکه عصبی	۱/٤۲	۲٦/٤	۸٦۱/۷۱

جدول ٦ انحراف از معیار مقدارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج نسبت به مقدارهای مطلوب (صفر)

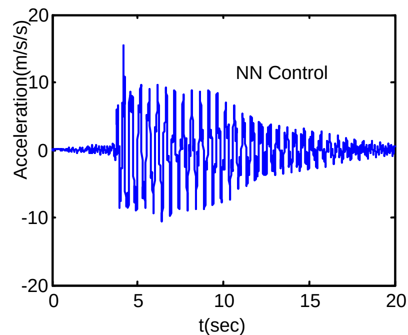
شیوه‌های کنترل	انحراف از معیار		
	تغییرمکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
با شبکه عصبی+ (LQR)	۰/۰۹۰۹۹	۰/۱۲۸	٢٤/۸۹
با شبکه عصبی	۰/٤۰	۵/۸٤	۱۰۰/۹۵

با توجه به نمونه‌های عددی این بخش، می‌توان به توانایی ساختار کنترل ترکیبی پی برد. ساختار کنترل ترکیبی هر سه مولفه شتاب ، سرعت و تغییرمکان را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. بنابراین، این ساختار کنترل را می‌توان برای بیشتر سازه ها به کار گرفت.

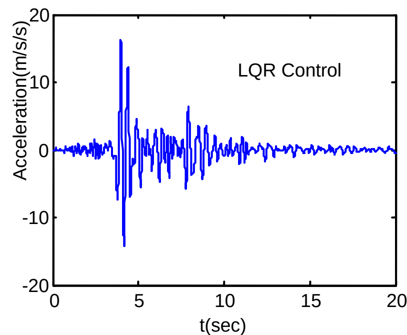
اثر تغییر مولفه‌های سازه بر روی ساختار کنترل

خطاهای اجرایی، یکی از بارزترین عامل تغییر مشخصه‌های سازه می‌باشد. عامل دیگر، وقوع زمین لرزه های متوسط و پس لرزه‌ها است. این تغییرسبب می‌شود که مشخصه‌های سازه،که برای طراحی ساختار کنترلی به کار می‌رود، با حالت واقعی آن، مطابقت نداشته باشد. اگر تغییر مشخصه‌های سازه زیاد باشد، باید با تخمین خسارت میزان تغییرهای آن را وارد کرد و سپس ساختار کنترل را بازسازی نمود. در این بخش، به اثر تغییرهای کم مشخصه‌های سازه درکنترل پرداخته می‌شود. در شیوه پیشنهادی، به دلیل بهره نجستن از پاسخ سازه برای ایجاد نیروی کنترل، تغییر در میزان سختی و میرایی، تاثیری در کنترل سازه ندارد. تنها جرم سازه، در ایجاد نیروی کنترل نقش موثری دارد. بنابراین، تغییر در جرم سازه، سبب کاهش کارآمدی ساختار کنترل می‌شود. در نمونه عددی پیشین، جرم سازه به میزان ۲۰ درصد کاهش می‌یابد تا اثر آن بر روی پاسخ سازه مشخص شود. شکل‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲)، به ترتیب، شتاب ، سرعت و تغییرمکان سازه را نشان می‌دهند. در جدول (۷)، مقدارهای بیشینه شتاب، سرعت و تغییرمکان در چهار حالت کنترل شده با روش LQR ، کنترل شده با شبکه عصبی، کنترل شده توسط گام پیشین شتاب زمین و کنترل ترکیبی مقایسه

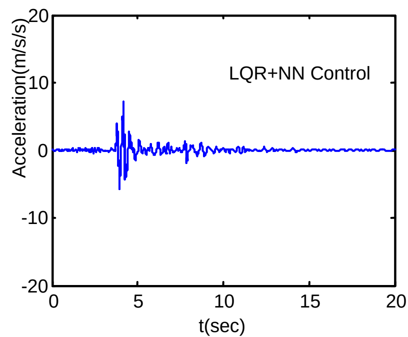
شده است. همچنین، میزان انحراف از معیار برای این چهار حالت در جدول (۸)، نشان داده شده است.



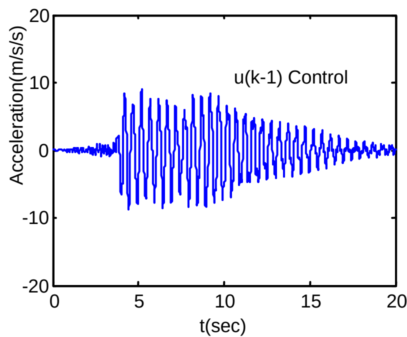
کنترل شده با شبکه عصبی



کنترل شده با روش LQR

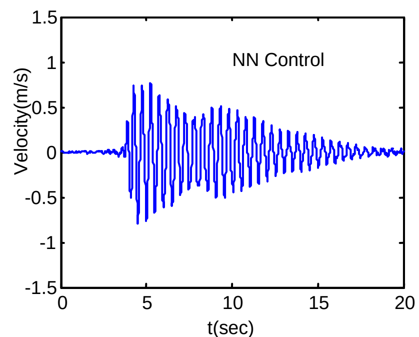


کنترل ترکیبی

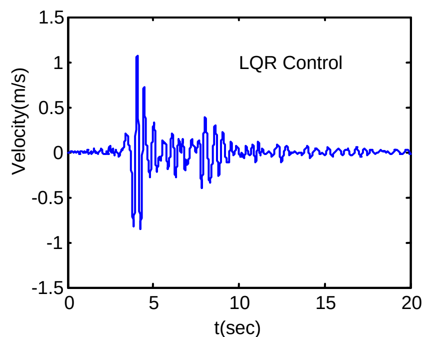


کنترل توسط گام پیشین شتاب زمین

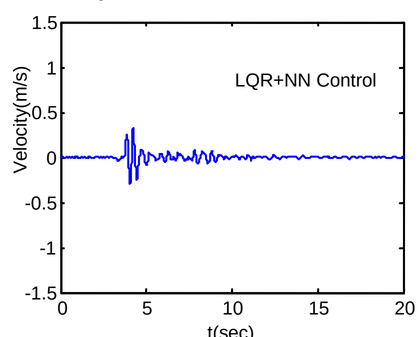
شکل ۲۰ شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با کاهش ۲۰ درصدجرم سازه درچهار حالت



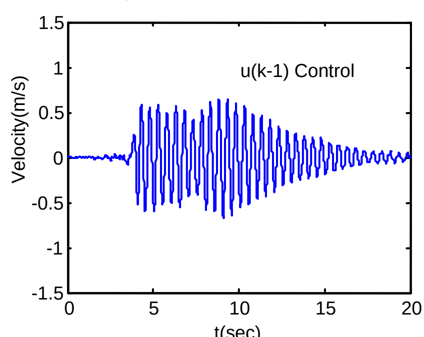
کنترل شده با شبکه عصبی



کنترل شده با روش LQR

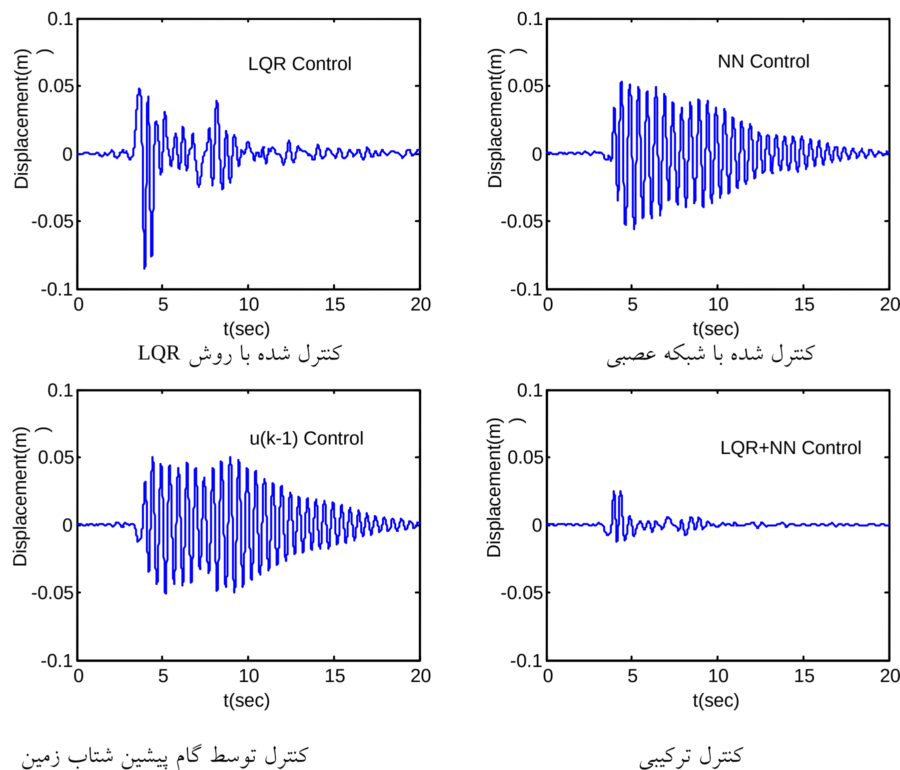


کنترل ترکیبی



کنترل توسط گام پیشین شتاب زمین

شکل ۲۱ سرعت طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با کاهش ۲۰ درصد جرم سازه



شکل ٢٢ تغییرمکان طبقه سوم سازه زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با کاهش ٢٠ درصد جرم سازه در چهار حالت

جدول ٧ بیشینه تغییرمکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه ، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج با ٢٠ درصد کاهش جرم سازه

شیوه‌های کنترل	تغییرمکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
	بیشینه	بیشینه	بیشینه
بهینه	٤/٧٩	١٠٦/١٥	١٦١٠
با شبکه عصبی	٥/٣١	٧٧	١٥٤٠
با گام پیشین	٥/٠٣	٦٥	٨٩٣
با شبکه عصبی + (LQR)	٢/٤٤	٣٢/٧	٧٢٠

جدول ٨ انحراف از معیار مقدارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب طبقه سوم سازه، زیر اثر شتاب نگاشت نورتریج نسبت به مقدارهای مطلوب(صفر)، با ٢٠ درصد کاهش جرم سازه

شیوه‌های کنترل	انحراف از معیار		
	تغییرمکان (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (cm/s/s)
بهینه	١/٣٣	١٥/٤	٢١٧/٨٨
با شبکه عصبی	١/٨٥	٢٣/٦	٣٣٣/١٥
با گام پیشین	٢/٠٠	٢٥/١٧	٣٢٧/١٥
با شبکه عصبی+ (LQR)	٠/٣٦٠	٤/٤٦	٦٦/٩

با توجه به شکل‌های(۲۰) تا (۲۲) وجدول‌های (۷) و (۸)، می‌توان دریافت که کاهش وزن سازه، اثر نامطلوبی در رفتار سازه با کنترل با شبکه عصبی پیش‌بین و کنترل با گام پیشین دارد. این وضعیت به دلیل این است که در این دو حالت، ساختار کنترل، از نوع ساختار کنترلی رفت می‌باشد. به دیگر سخن، برای تولید نیروی کنترلی از پاسخ سازه استفاده نمی‌شود. ساختار کنترلی متوجه کاهش جرم سازه نشده و بیش از مقدار نیاز به سازه نیرو وارد می‌کند. بنابراین، تغییرمکان‌های افزایش یافته، خلاف جهت حرکت سازه در حالت کنترل نشده می‌باشد. در کنترل ترکیبی، با توجه به اینکه برای تولید نیروی کنترلی، از ویژگی‌های اولیه سازه و پاسخ سازه استفاده می شود اثر کاهش وزن در کنترل سازه کمتر است. در این حالت، پاسخ سازه در تولید نیروی کنترل نقش دارد و ساختار کنترل، کاهش جرم سازه را تا حدودی متوجه می‌شود. به همین دلیل، اثر کاهش جرم سازه در این ساختار کنترل کمتر می‌باشد. بنایراین، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار کنترل ترکیبی، شیوه مناسب‌تری برای کنترل سازه است.

نتیجه‌گیری

به کار بردن یک شبکه‌ی عصبی پیش‌بین شتاب زمین، راهکار پیشنهادی در این مقاله می‌باشد. این شیوه در کمینه کردن مولفه‌های پاسخ سازه موفق می‌باشد، ولی به هیچ وجه پایداری سازه را تضمین نمی‌کند. با افزودن یک کنترل کننده بهینه در ساختارکنترل و ایجاد یک سامانه‌ی کنترل ترکیبی، افزون بر تضمین پایداری سازه، عملکرد سامانه کنترل را بهتر می‌سازد. به سخن دیگر، روش پیشنهادی از یک شبکه‌ی عصبی برای ایجاد نیروی کنترل مناسب‌تر و یک کنترل کننده بهینه برای پایداری بیشتر ساختار کنترل بهره می‌گیرد. همچنین، اثرهای نامطوب تغییر جرم سازه، که در هنگام زمین لرزه های متوسط و پس لرزه‌ها ایجاد می شود، نیز کاهش می‌یابد. نمونه‌های عددی بروشنی توانایی این شیوه را آشکار کردند. تنها کاستی روش پیشنهادی نویسندگان، نیاز به استفاده حسگر و محرک در همه درجه‌های آزادی برای اندازه‌گیری پاسخ سازه و ایجاد نیروی مناسب کنترلی می‌باشد.

نشانه‌ها

تغییرمکان سازه	u
شتاب زمین	$\ddot{u}_g$
شتاب پیش‌بینی شده	$\hat{\ddot{u}}_g$
شتاب زمین در n گام پیشین	$\ddot{u}_g(k-n)$
بایاس	b
وزن‌های شبکه عصبی	w
زمان	t
تابع شبکه عصبی	f
نماد دیرکرد زمان	$1/z$
شمار داده‌ها	n

مراجع

1. Hong-Nan L. and Hao Y., "System Ientification of Dynamic Structure by the Multi-branch BPNN", *Neurocomputing*, 70, pp. 835-841, (2007).
2. Ghaboussi. J., Garrett Jr. J.H. and Wu X., "Knowledge–Based Modeling of Material Behavior with Neural Neworks.", *J. Engineering Mechanics*, 117, (1), pp. 132-153, (1991).
3. Ghaboussi, J. and Nikzad K., "Actutor Dynamics and Delay Compensation using Neurocontrols", *ASCE, J. Engineering Mechanics*, 122(10), pp. 966-975, (1996).
4. Hosuner, G.W., Bergman C.A., Caughey T.K., Soong T.T., Spenser, B.F., Chassiakos A.G., Claus R.O., Masri S.F., Skelton R.E. and Tao J.T.P., "Structural Control: Past, Present, and Future", *J. Engineering*

Mechanics, 123(9), pp 897-962, (1997).

5. Patino, H.D. and Derong, L.,"Neural Network-Based Model Reference Adaptive Control System", *IEEE Transaction on System*.Part B:Cybernetics, 30(1), (2000).
6. Chen H.M., Tsai K.H., Qi G.Z. and Yang, J.C.S., "Neural Network for Structural Control", *ASCE*, *J. Computing in Civil Engng*, 9, pp. 168-176, (1995).
7. Ghaboussi, J. and Joghataie, A., "Active Control of Structure using Neural Network", *ASCE*, *J. Engineering Mechanics*, 121(4), pp. 555-567, (1995).
8. Ghaboussi, J. and Bani-Hani, K., "Nonlinear Structure Control using Neural Network", *ASCE*, *J. Engineering Mechanics*, 124(3), pp. 319-327, (1998).
9. Ghaboussi, J. and Bani-Hani, K., "Neural Network for Structure Control of a Benchmark Problem ,Active Tendon System", *J. Earthquake Engng. Structure*, Dyn. 27, pp. 1225-1245, (1998).
10. Yu-Ao, H. and Jianjun, W.,"Control of Structural Seismic Response by Self-Recurrent Neural Network(SRNN)", *J. Earthquake Engng. Structure*, Dyn. 27, pp. 641-648, (1998).
11. Dong-Hyawn K. and In-won L., "Neural-Control of Seismically Excited Steel Structure Through Sensitivity Evaluation Scheme", *J. Earthquake Engng. Structure*, 30, pp. 1361-1377, (2001).
12. Ratneshwar J. and Chengli H., "Neural-network-based Adaptive Predictive Control for Vibration Suppression of Smart Structures", *Smart Mater. Struct*., 11, p. 909, (2002).
13. Rao M. M. and Datta T. K., "Modal Seismic Control of Building Frames by Artificial Neural Network", *ASCE*, .*J. Computing in Civil Engng*, 20(1), pp. 69-73, (2006).
14. Rezaiee-Pajand M., Akbarzadeh-T M.-R. and Nikdel A., "Direct Adaptive Neurocontrol of Structures under Earth Vibration", *Computing in Civil Engineering*, 23(5), pp. 299-307, (2009).
15. MATLAB, The Math Works, Inc. Natick, Massachusetts, (2000).
16. Chung L.L., Lin R.C., Soong T.T. and Reinhorn, A.M., "Experimental Study of Active Control for MDOF Seismic Structures", *J. Engineering Mechanics*, 115(9), pp. 1609-1627, (1989).
17. Aaron S. B. and Yang H.T.Y., "Neural Networks for Multi-objective Adaptive Structural Control", *Journal of Structural Engineering*, 127(2), pp. 203–210, (2001).
18. Dorey, A.P. and Moore, J.H., *"Advances in actuators, Institute of Physics Publishing"*, (1995).
19. Connor, J.,"Introduction to structural Motion on Control." Massachusetts Institute of Technology, (2001).